

4

碩士學位論文

3相 誘導電動機 運轉에 대한
高調波 位相角 影響의 分析

指導教授 左宗根



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

高 晟 弼

2006

3相 誘導電動機 運轉에 대한 高調波 位相角 影響의 分析

指導教授 左宗根

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2006年 6月 26日




濟州大學校 產業大學院

電子電氣工學科 電氣工學專攻

高 晟 弼

高晟弼의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2006年 6月 26日

委員長	金 一 煥	
委 員	左 宗 根	
委 員	金 豪 贊	

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 기본해석 이론	3
1. 전압, 전류 왜형률과 파형률	3
2. 등가회로 해석	5
III. 시뮬레이션 및 분석	9
IV. 결 론	34
참고문헌	35



LIST OF FIGURES

Fig. 1 Equivalent circuit of three phase induction motor per phase	5
Fig. 2 Comparison of current distortion factor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	11
Fig. 3 Comparison of voltage form factor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	14
Fig. 4 Nonsinusoidal voltage waveforms in VDF = 10% which include fundamental with 2nd order harmonic and current waveforms at 1500rpm	17
Fig. 5 Nonsinusoidal voltage waveforms in VDF = 10% which include fundamental with 4th order harmonic and current waveforms at 1500rpm	18
Fig. 6 Nonsinusoidal voltage waveforms in VDF = 10% which include fundamental with 5th order harmonic and current waveforms at 1500rpm	19
Fig. 7 Nonsinusoidal voltage waveforms in VDF = 10% which include fundamental with 7th order harmonic and current waveforms at 1500rpm	20

Fig. 8 Comparison of current form factor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	22
Fig. 9 Comparison of input voltage with the voltage harmonic orders from 2 to 7	26
Fig. 10 Comparison of input current with the voltage harmonic orders from 2 to 7	28
Fig. 11 Comparison of efficiency with the voltage harmonic orders from 2 to 7	31



LIST OF TABLES

Table 1	Comparison of current distortion factor of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	10
Table 2	Comparison of voltage form factor of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	13
Table 3	Comparison of current form factor of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	21
Table 4	Comparison of input voltage of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	25
Table 5	Comparison of input current of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	27
Table 6	Comparison of efficiency of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7	30

Analysis of Harmonic Phase Angle Effect on Three Phase Induction Motor Operation

Sung-Pil Kho

Department Of Electronic and Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University

Supervised by professor Chong-Keun Jwa

Summary

This paper describes an analysis of the effect of low harmonic orders and phase angles on the operation performance of a three-phase induction motor. In the analysis, the voltage harmonic orders from 2 to 7, with the three different voltage distortion factors were chosen except the triple harmonics, and each harmonic order was designed into four kinds of waveforms whose phase angles are divided one cycle into four parts. The analyzed data includes current distortion factor, voltage form factor, current form factor, input voltage, input current, and

efficiency. From the analyzed result, it is found that the operation performance of a three-phase induction motor does not vary by phase angle of each individual harmonic order. But both voltage and current form factors related to the waveforms are affected by the harmonic phase angle in odd harmonics.



I. 서론

전력계통에서 유도전동기는 전체 전기에너지 소비의 70%를 차지하고 있을 정도로 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 최근 전력전자 기술의 발달로 인하여 유도전동기 제어용 인버터 사용이 크게 증가하고 있으면서 고조파로 인한 문제들은 전력회사와 소비자들에게 오랫동안 성가신 문제가 되고 있다.

고조파의 발생 원인은 다음과 같이 분류할 수 있다[1].

첫째, 강 압연, 아크로, 그리고 전기 아크용접기 등과 같은 비선형 부하들의 운전으로 상당한 전류왜형과 송배전 계통에 우수고조파의 발생가능성이 있다.

둘째, 전력 반도체 기술의 발전에 따라 무정전 전원, 위상 제어기, 인버터, 사이클로컨버터 등의 많은 전력전자 장치의 사용으로 부수적인 고조파전류가 있다.

셋째 발전, 송전, 그리고 배전계통에서 변압기, 회전기, 리액터 등과 같이 이들 기기들이 다양한 가포화 자기재료로 제작되어 있다.

넷째, 병렬 커패시터와 직렬 인덕터의 각각은 고조파를 발생하지 않지만 기존의 고조파 레벨을 확대할 수 있는 공진의 가능성이 있다.

이러한 고조파가 발생하면 부하요소인 유도전동기가 영향을 받게 될 것이다. 이에 따라 전력계통에서 발생하는 시간고조파에 의한 유도전동기 운전성능 영향에 대한 많은 연구가 계속되고 있다. Doggett와 Queer[2]는 고조파 전압이 인가된 전동기를 기본파 전동기와 고조파 전동기가 같은 축에 연결된 것으로 생각하여 시험하고 운전 성능을 분석하여 10% 이하의 고조파는 무부하시를 제외하고 큰 영향이 없음을 확인하였고, Jain[3]은 고조파 전원에 의한 정지상태에서 기본파 동기속도까지의 운전을 분석하기 위하여 다양한 차수의 고조파 전압 인가시 회전자 시정수 개념을 도입하여 고정자 저항을 무시한 T형 등가회로에 의하여 해석하였다.

Klingshim과 Jordan[4]은 고조파 전압 인가시 전동기운전의 일반적 이론과 전동기의 전류, 손실, 토크를 예측하는 계산법을 제시하였고, Lee 등[5]은 서로 다른 전압왜형률에서 전동기의 성능을 조사하기 위하여 실험으로 효율, 온도상승, 비틀림진동 등을 분석하였으며, 또한 Lee 등[6]은 다양한 전압왜형률에서의 2에서 13까지 각각의 고조파 차수의 영향을 실험으로 분석하였다.

Vamvakari 등[7]은 전동기의 포화와 누설자속과 관련된 철손의 증가를 고려해 보기 위하여 저차수의 고조파가 존재할 때 수정된 정밀 T형 등가회로를 사용하였고, Lumyoung과 Chat-uthai[8]는 3상 비정현 전압파형을 발생하기 위한 전원장치와 결합된 브러시 없는 동기릴럭턴스발전기의 기법을 제안하고 이를 사용하여 제11차 고조파까지의 영향을 분석하였다. 김과 좌[9]는 T형 등가회로에 의하여 다양한 전압 왜형률에서의 제13차 고조파까지 부하변동에 따른 전류왜형률과 효율을 구하여 분석하였다. 또한, Lee 등[1]은 실험으로 15%와 20%의 전압왜형률을 갖는 2에서 7까지 각각의 고조파의 위상각이 45°씩 8개의 파형에 대한 운전성능을 조사하였다.

그러나 이들의 연구에서는 부하변화와 전압왜형률에 따른 고조파 위상변화에 의한 전압과 전류의 파형률에 대한 분석은 되어 있지 않다.

본 논문에서는 IEEE T형 등가회로를 구성하고 시뮬레이션 도구로 Mathcad를 사용한다. 이 전동기에 전압왜형률이 5%, 10%, 그리고 15%인 저차수의 고조파가 포함된 경우에 대하여 고조파의 위상이 각각 0 , $\frac{\pi}{2}$, π , $\frac{3\pi}{2}$ 일 때 기본파와 하나의 고조파로 합성된 비정현파 전압이 인가된 경우, 제7고조파까지 부하변화에 따른 전류왜형률, 전압파형률, 전류파형률, 전압실효치, 입력 전류실효치, 그리고 효율을 시뮬레이션하고 이들의 결과들을 정격부하 전후로 부하가 변화 할 때의 특성을 비교하여 분석한다.

II. 기본해석 이론

1. 전압, 전류 왜형률과 파형률

비정현파 전압, 전류 파형의 왜형 정도를 나타내는 왜형률과 파형의 기울기의 정도를 나타내는 파형률은 다음과 같이 정의된다.

IEEE-519에 의한 전전압 고조파 파형률(total voltage harmonic distortion factor, THD_v)은

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}{V_1^2}} \times 100 \quad (1)$$

이고, 제k차 고조파에 의한 전압왜형률(voltage distortion factor, VDF)은

$$VDF = \frac{V_k}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

이며, 이와 유사하게 제k차 고조파에 의한 전류왜형률(current distortion factor, CDF)는

$$CDF = \frac{I_k}{I_1} \times 100 \quad (3)$$

이다. 여기서, V_1 , I_1 , 과 V_k , I_k 는 각각 기본파 전압, 전류와 제k차 고조파 전압, 전류의 크기이다.

전압파형률(voltage form factor, VFF)와 전류파형률(current form factor, CFF)은 각각 다음과 같다.

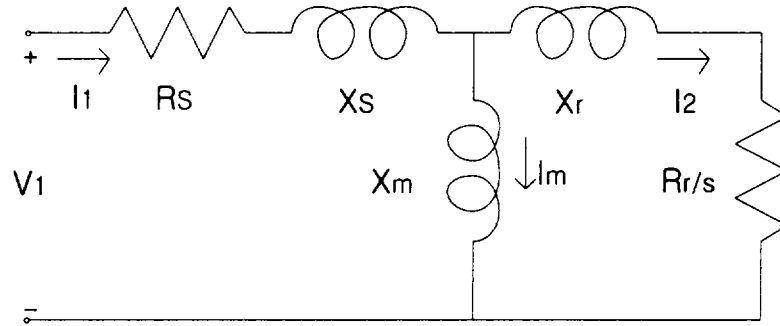
$$VFF = \frac{V_{rms}}{V_{av}} \quad (4)$$

$$CFF = \frac{I_{rms}}{I_{av}} \quad (5)$$

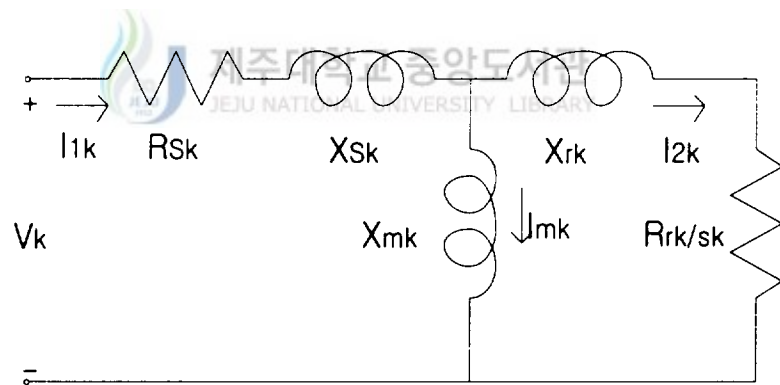
여기서, V_{rms} , I_{rms} 와 V_{av} , I_{av} 는 각각 실효치 전압, 전류와 평균치 전압, 전류이다.

2. 등가회로와 해석

고조파 파형에 의한 유도전동기 운전의 영향을 해석하기 위하여, Fig. 1과 같은 IEEE T형 등가회로를 사용한다. 이 등가회로에서 R_s 와 X_s 는 고정자측, R_r 과 X_r 은 고정자측으로 환산한 회전자측의 저항과 리액턴스이며, X_m 과 s 는 각각 자화 리액턴스와 슬립을 표시한다.



(a) fundamental



(b) the kth order harmonic

Fig. 1 Equivalent circuit of three phase induction motor per phase

또한 V_1 과 V_k 는 기본파와 제 k 차 고조파 전압을 I_1, I_m, I_2 는 각각 고정자, 자회회로, 고정자측으로 환산한 회전자 전류를 표시하고 하첨자 k 는 제 k 차 고조파 성분을 나타낸다.

등가회로에 비정현파의 고조파전압이 인가될 때 이론적으로 어떤 비정현 주기파형도 Fourier 분석에 의하여 기본파와 기본파의 정수배 주파수의 고조파의 합으로 변환될 수 있다. 그러므로 한상의 비정현파 인가 전압 파형은 식(6)으로 표현될 수 있다. 이 전압이 유도전동기에 인가되면 전동기의 고정자전류는 식(7)과 같다.

$$v(t) = \sqrt{2} \left[V_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{k=2}^{\infty} V_k \sin(k\omega t + \theta_k) \right] \quad (6)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \left[I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{k=2}^{\infty} I_k \sin(k\omega t + \phi_k) \right] \quad (7)$$

여기서, ω 는 전원 각주파수이고, θ_1, ϕ_1 은 각각 기본파 전압, 전류 위상각이며, θ_k 와 ϕ_k 는 각각 제 k 차 고조파 전압, 전류 위상각이다.

본 논문에서는 고조파 인가전압이 기본파와 제 k 차 고조파의 합으로 된 전압의 고조파 위상의 변화에 따른 특성을 계산하여 해석한다.

이때 제3차 고조파와 이의 배수 고조파는 n 을 양의 정수라 할 때 $k=3n$ 차수 고조파는 고정자권선이 Y결선일 때는 전류가 흐를 수 없고 Δ 결선일 때는 각상 동위상의 전류가 흘러 이로 인한 자계가 회전하지 않으므로 영상분 고조파라 하고 해석에서 제외한다. 4차, 7차와 같은 $k=3n+1$ 차수의 고조파는 기본파 회전자계와 같은 방향으로 회전하므로 정상분 고조파라 하고, 2차, 5차와 같은 $k=3n+2$ 차수의 고조파는 기본파 회전자계와 반대방향으로 회전하므로 역상분 고조파라 한다.

등가회로에서 기본파 회전자계에 대한 슬립 s 는

$$s = \frac{Ns - N}{Ns} \quad (8)$$

이고, 고조파 회전자계에 대한 슬립 sk는

$$sk = \frac{kNs \mp N}{kNs} = \frac{k \mp (1-s)}{k} \quad (9)$$

이다. 여기서 Ns는 기본파 회전자계의 속도이고, N은 회전자의 속도이다.

그리고, 슬립에서 부호중 -는 정상분 고조파일 때이고 +는 역상분 고조파일 때이다.

식(6)의 비정현파 전압이 다음과 같은 형으로 전동기에 인가되면

$$v(t) = \sqrt{2}[V_1 \sin(\omega t + \theta_1) + V_k \sin(k\omega t + \theta_k)] \quad (10)$$

전류는

$$i(t) = \sqrt{2}[I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + I_k \sin(k\omega t + \phi_k)] \quad (11)$$

이 된다.

그러므로, 전압, 전류의 실효치와 평균치는 다음식으로 구하고 각각의 파형률을 구할 수 있다. 실효치는

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (12)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad (13)$$

이고, 평균치는

$$V_{av} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} v(t) dt \quad (14)$$

$$I_{av} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i(t) dt \quad (15)$$

이다. 여기서, T는 비정현 주기파의 주기이다.

Ⅲ. 시뮬레이션 및 분석

비정현파의 고조파 위상에 의한 유도전동기 운전 특성을 분석하기 위하여 사용한 전동기는 Lab Volt사의 정격전압 208V, 전류 1.3A, 출력 175W, 주파수 60Hz, 회전수 1500rpm인 4극의 3상 권선형 유도전동기이다. 등가회로 정수는 $R_s=12.5\Omega$, $R_r=14.9\Omega$, $X_s=X_r=8.8\Omega$, 그리고 $X_m=180\Omega$ 이다.

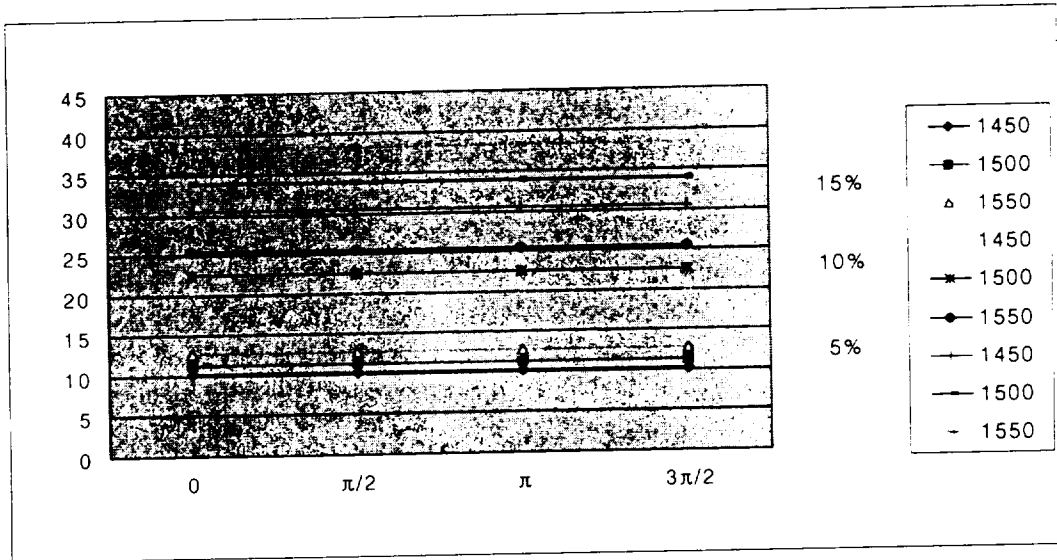
이 전동기에 전압왜형률이 5%, 10%, 그리고 15%의 기본파와 하나의 고조파로 합성된 비정현파 전압이 인가된 경우의 저차수의 고조파 중 역상분으로 2차, 5차 그리고 정상분으로 4차, 7차의 고조파 전압이 인가될 때 각 고조파의 위상각이 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 의 4가지 경우의 파형에 대하여 정격부하 전후로 부하가 변화할 때의 제 특성을 Fig. 1의 등가회로를 사용하여 계산하고 분석한다.

Table 1, 2, 3, 4, 5, 6은 각각 기본파와 제2차, 제4차, 제5차, 그리고 제7차 고조파 전압이 합성된 파형이 유도전동기에 인가될 때 부하, 전압왜형률(VDF), 그리고 고조파 위상각 변화에 따른 전류왜형률(CDF), 전압파형률(VFF), 전류파형률(CFF), 입력전압(V_{rms}), 입력전류(I_{rms}), 그리고 효율(Eff)의 계산치를 비교한 것이다.

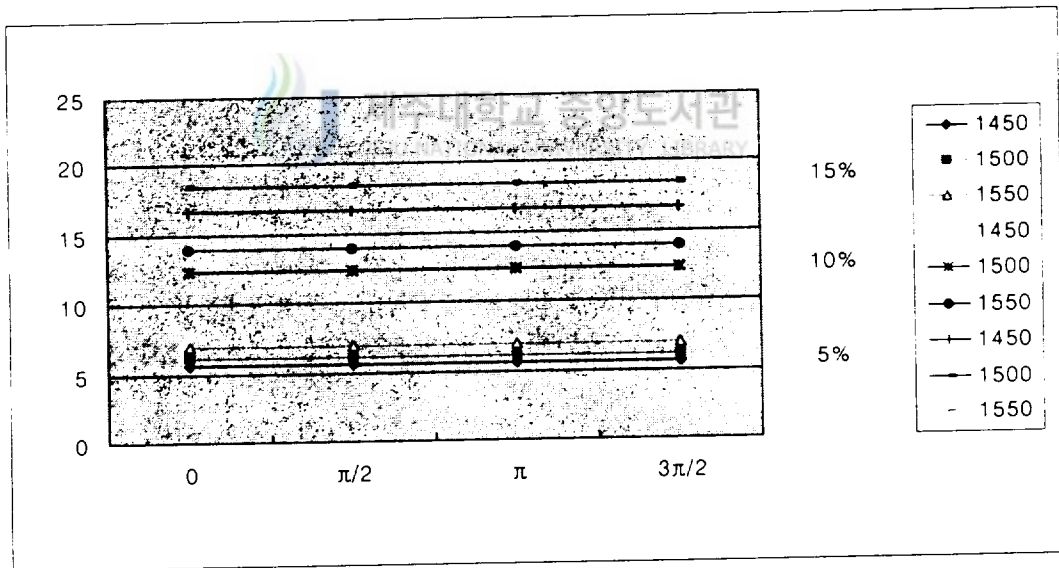
Table 1 Comparison of current distortion factor[%] of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7

V D F [%]	Harmonic order	2th			4th			5th			7th		
	Harmonic phase angle [rad]	Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]		
		1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550
5	0	10.133	11.281	12.741	5.543	6.157	6.938	4.660	5.181	5.845	3.369	3.745	4.224
	$\pi/2$	10.133	11.281	12.741	5.543	6.157	6.938	4.660	5.181	5.845	3.369	3.745	4.224
	π	10.133	11.281	12.741	5.543	6.157	6.938	4.660	5.181	5.845	3.369	3.745	4.224
	$3\pi/2$	10.133	11.281	12.741	5.543	6.157	6.938	4.660	5.181	5.845	3.369	3.745	4.224
10	0	20.267	22.562	25.481	11.085	12.313	13.876	9.319	10.363	11.690	6.738	7.490	8.447
	$\pi/2$	20.267	22.562	25.481	11.085	12.313	13.876	9.319	10.363	11.690	6.738	7.490	8.447
	π	20.267	22.562	25.481	11.085	12.313	13.876	9.319	10.363	11.690	6.738	7.490	8.447
	$3\pi/2$	20.267	22.562	25.481	11.085	12.313	13.876	9.319	10.363	11.690	6.738	7.490	8.447
15	0	30.400	33.843	38.222	16.628	18.470	20.814	13.979	15.544	17.535	10.107	11.235	12.671
	$\pi/2$	30.400	33.843	38.222	16.628	18.470	20.814	13.979	15.544	17.535	10.107	11.235	12.671
	π	30.400	33.843	38.222	16.628	18.470	20.814	13.979	15.544	17.535	10.107	11.235	12.671
	$3\pi/2$	30.400	33.843	38.222	16.628	18.470	20.814	13.979	15.544	17.535	10.107	11.235	12.671

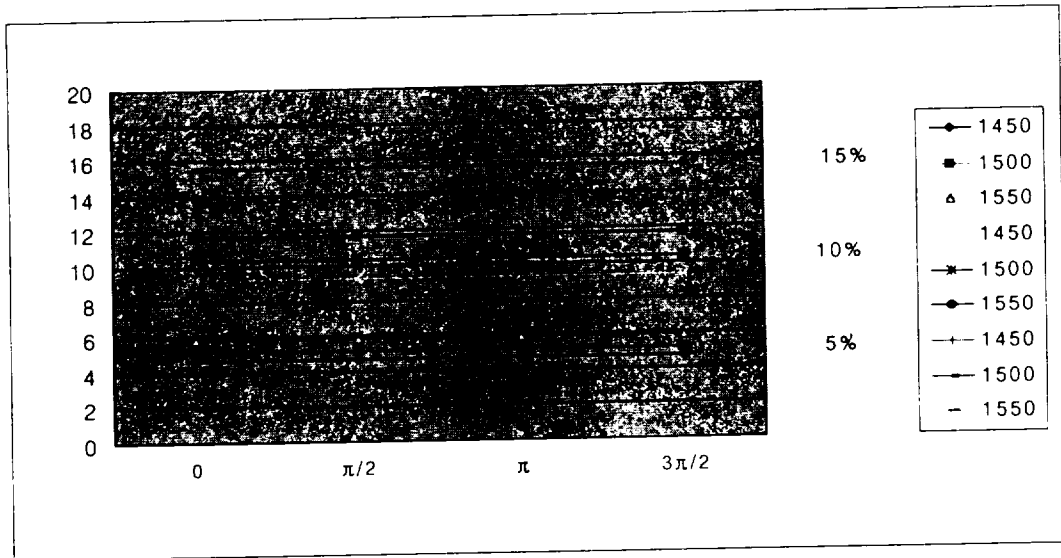
Fig. 2 Comparison of current distortion factor with the voltage harmonic orders from 2 to 7



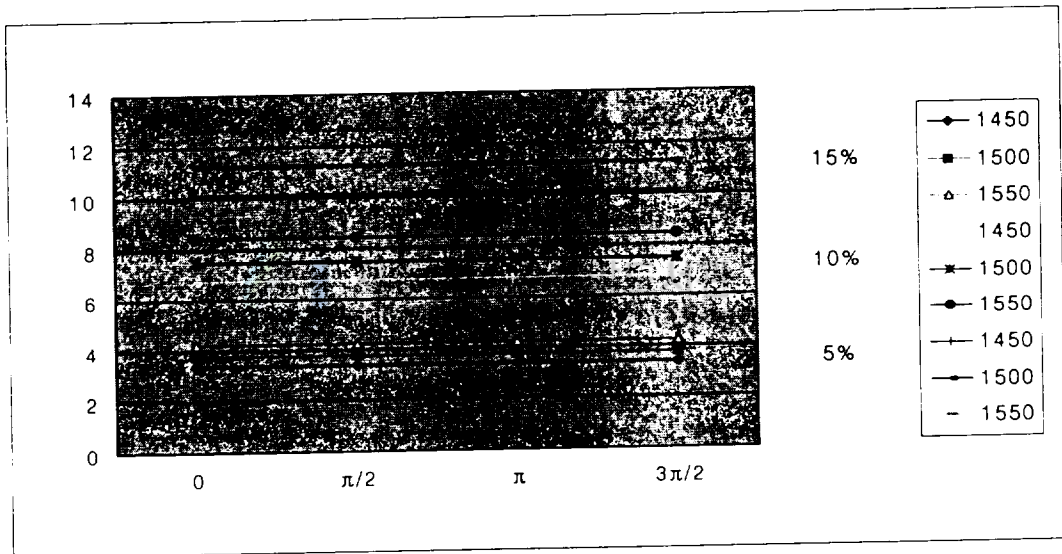
a) Current distortion factor with 2nd order harmonic



b) Current distortion factor with 4th order harmonic



c) Current distortion factor with 5th order harmonic



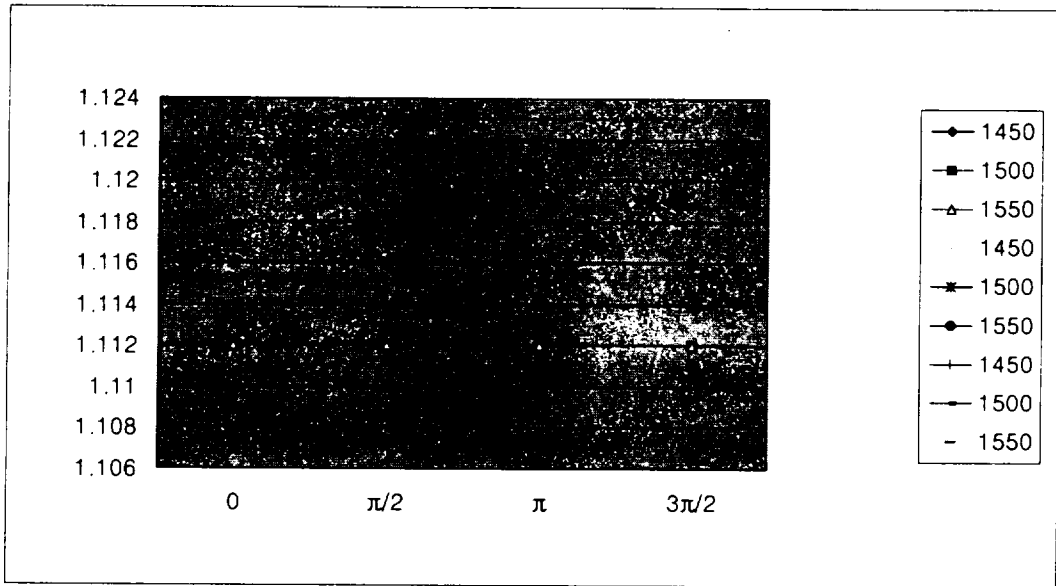
d) Current distortion factor with 7th order harmonic

전류왜형률은 Table 1과 Fig. 2에서 보듯이 전압왜형률이 클수록 커지며 저차수의 전압고조파일 수록 커지고, 경부하가 될 수록 커지고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 부하가 일정하면 전압왜형률에 비례하여 변화하지만 전압고조파 위상각의 영향은 받지 않고 있다.

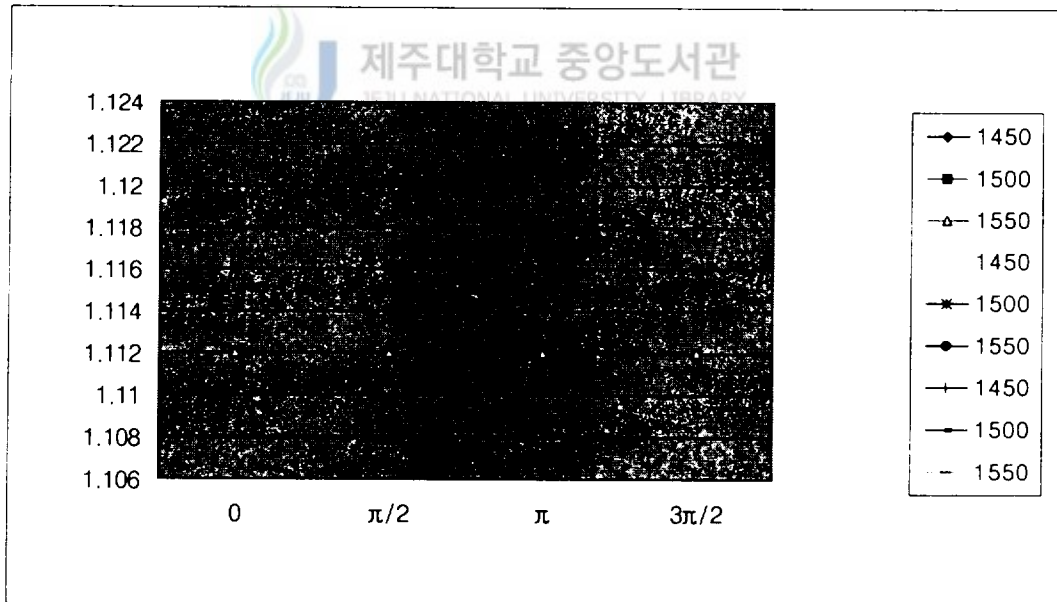
Table 2 Comparison of voltage form factor[pu] of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7

V D F [%]	Harmonic order	2th			4th			5th			7th		
	Harmonic phase angle [rad]	Speed(rpm)			Speed(rpm)			Speed(rpm)			Speed(rpm)		
		1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550
5	0	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.101	1.101	1.101	1.104	1.104	1.104
	$\pi/2$	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.121	1.121	1.112	1.112	1.112
	π	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.123	1.123	1.123	1.120	1.120	1.120
	$3\pi/2$	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112	1.112
10	0	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.094	1.094	1.094	1.100	1.100	1.100
	$\pi/2$	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116
	π	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.139	1.139	1.139	1.132	1.132	1.132
	$3\pi/2$	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116
15	0	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.090	1.090	1.090	1.099	1.099	1.099
	$\pi/2$	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123
	π	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.158	1.158	1.158	1.148	1.148	1.148
	$3\pi/2$	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123	1.123

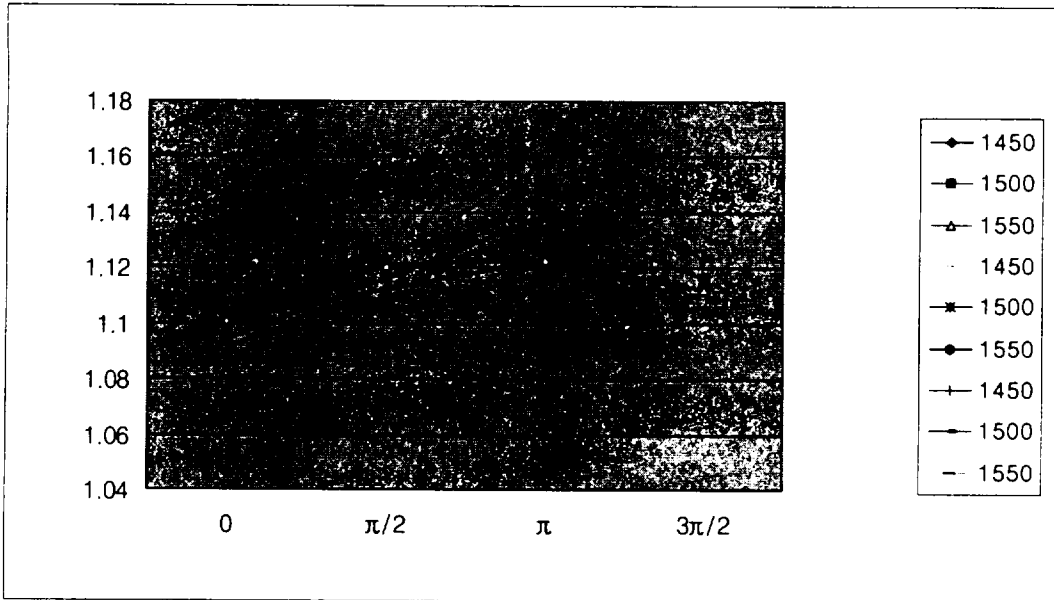
Fig. 3 Comparison of voltage form factor with the voltage harmonic orders from 2 to 7



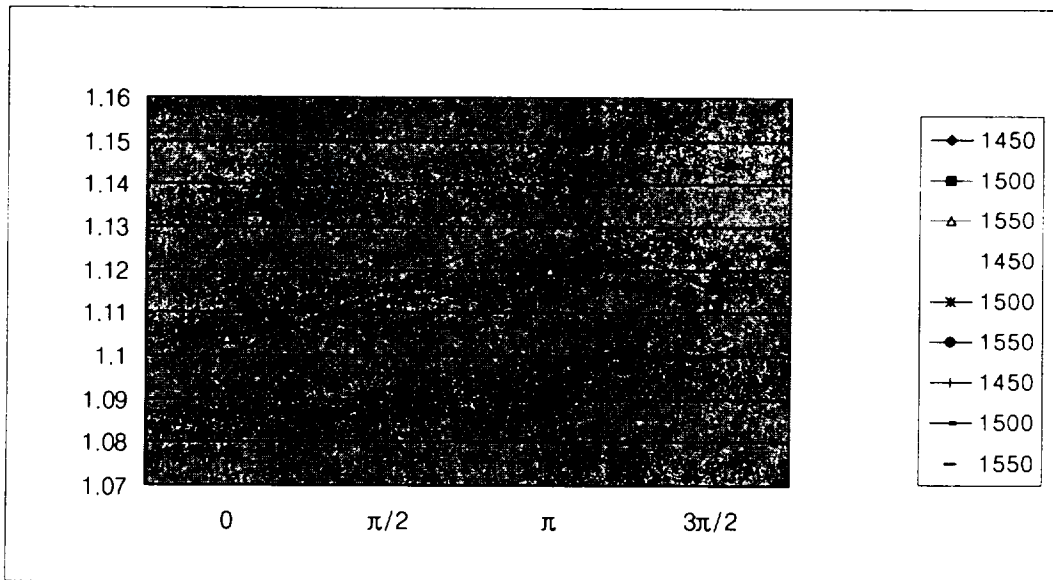
a) Voltage form factor with 2nd order harmonic



b) Voltage form factor with 4th order harmonic

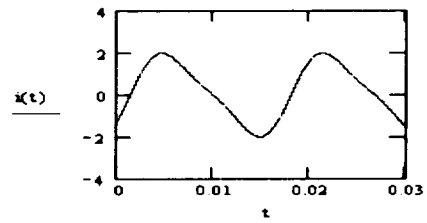
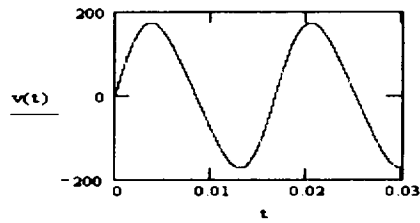


c) Voltage form factor with 5th order harmonic

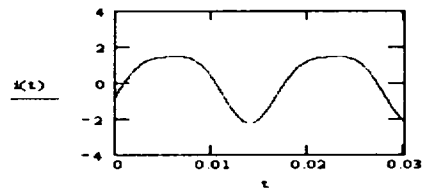
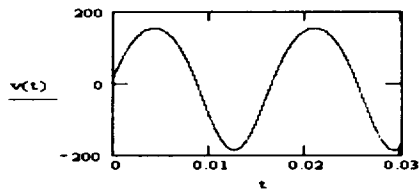


d) Voltage form factor with 7th order harmonic

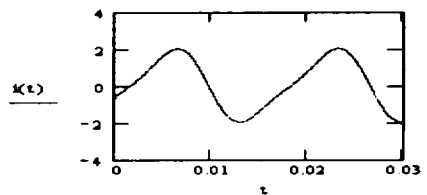
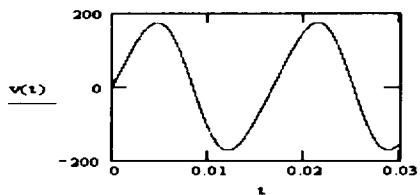
Table 2와 Fig. 3, 4, 5에서 보듯이 입력 전압파형률은 전압왜형률이 클수록 커지고 제2차, 제4차 고조파인 우수고조파에서 부하 변동에 관계없이 전압고조파 위상각의 영향을 받지 않고 있다. Table 2와 Fig. 3, 6, 7에서 보듯이 입력 전압파형률은 제5차, 제7차 고조파인 기수고조파에서 전압고조파 위상각에 따라 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 입력 전압파형률은 전압왜형률에 따라 전압고조파 위상각이 π 일 때 가장 크고 대칭 분포의 값을 가지고 있다.



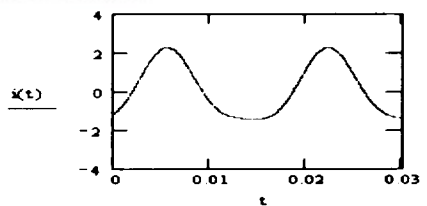
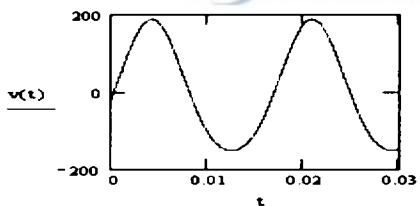
a) Harmonic voltage phase angle = 0



b) Harmonic voltage phase angle = $\pi/2$

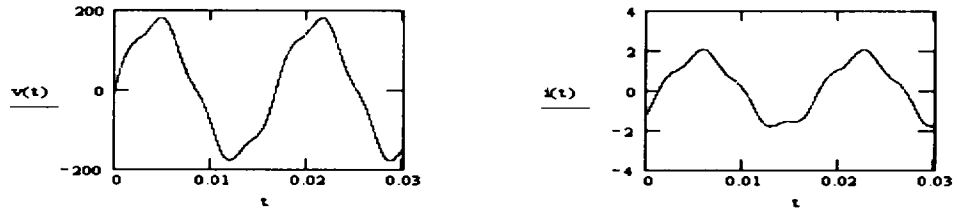


c) Harmonic voltage phase angle = π

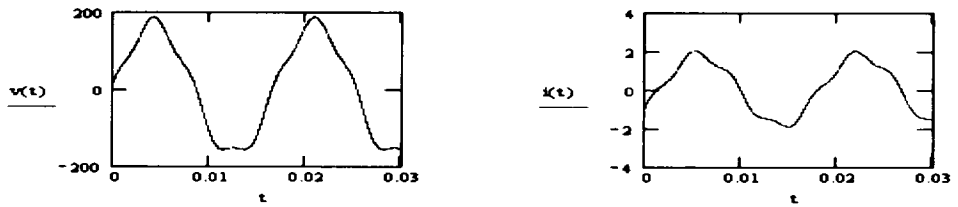


d) Harmonic voltage phase angle = $3\pi/2$

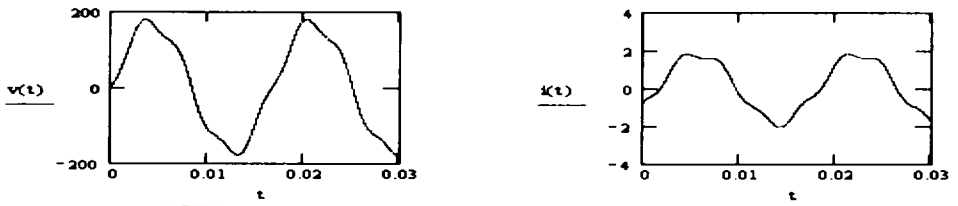
Fig. 4 Nonsinusoidal voltage waveforms in VDF = 10% which include fundamental with 2nd order harmonic and current waveforms at 1500rpm



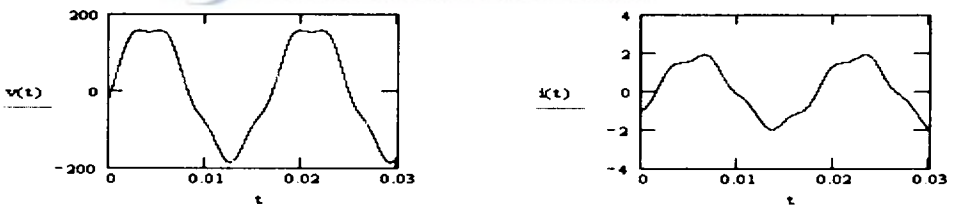
a) Harmonic voltage phase angle = 0



b) Harmonic voltage phase angle = $\pi/2$

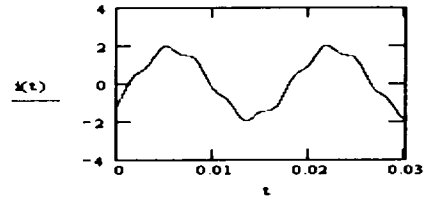
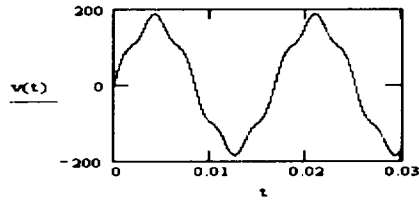


c) Harmonic voltage phase angle = π

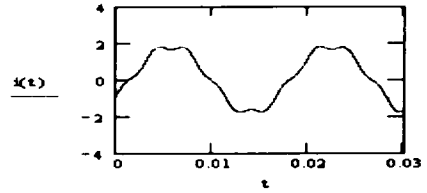
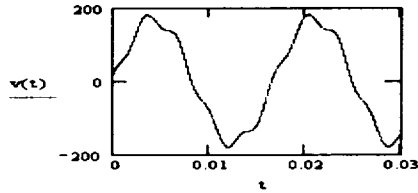


d) Harmonic voltage phase angle = $3\pi/2$

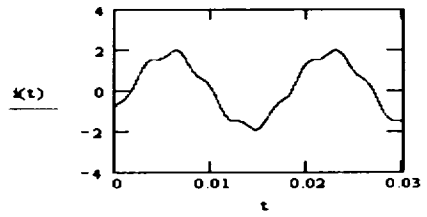
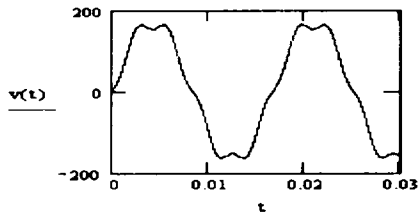
Fig. 5 Nonsinusoidal voltage waveforms in VDF = 10% which include fundamental with 4th order harmonic and current waveforms at 1500rpm



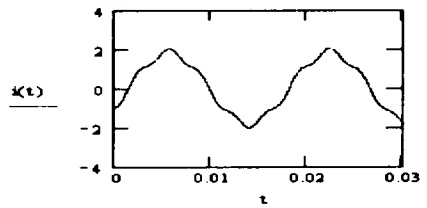
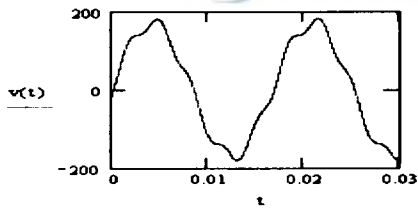
a) Harmonic voltage phase angle = 0



b) Harmonic voltage phase angle = $\pi/2$

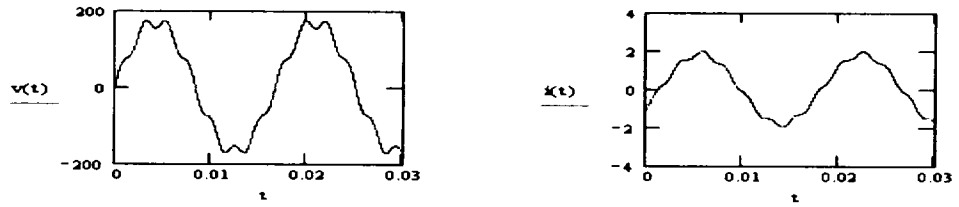


c) Harmonic voltage phase angle = π

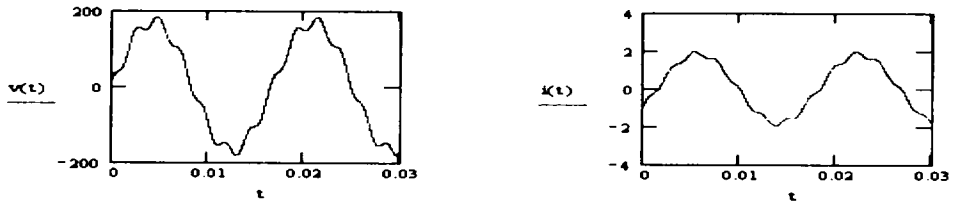


d) Harmonic voltage phase angle = $3\pi/2$

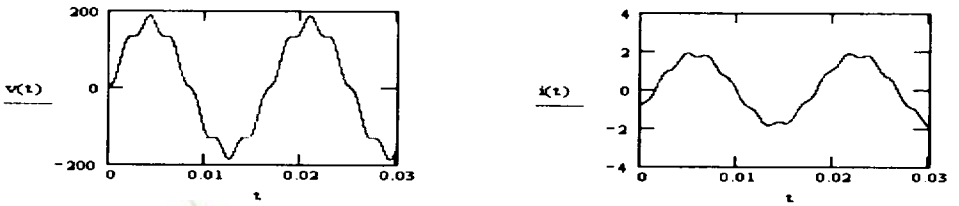
Fig. 6 Nonsinusoidal voltage waveforms in VDF = 10% which include fundamental with 5th order harmonic and current waveforms at 1500rpm



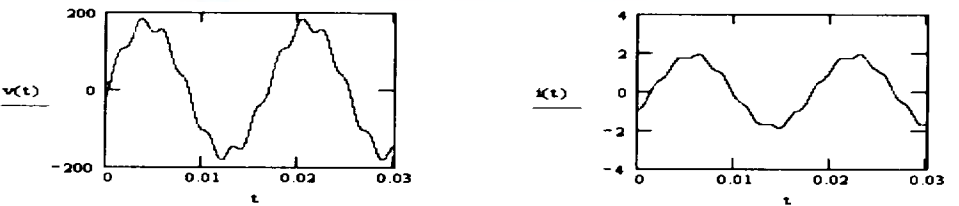
a) Harmonic voltage phase angle = 0



b) Harmonic voltage phase angle = $\pi/2$



c) Harmonic voltage phase angle = π



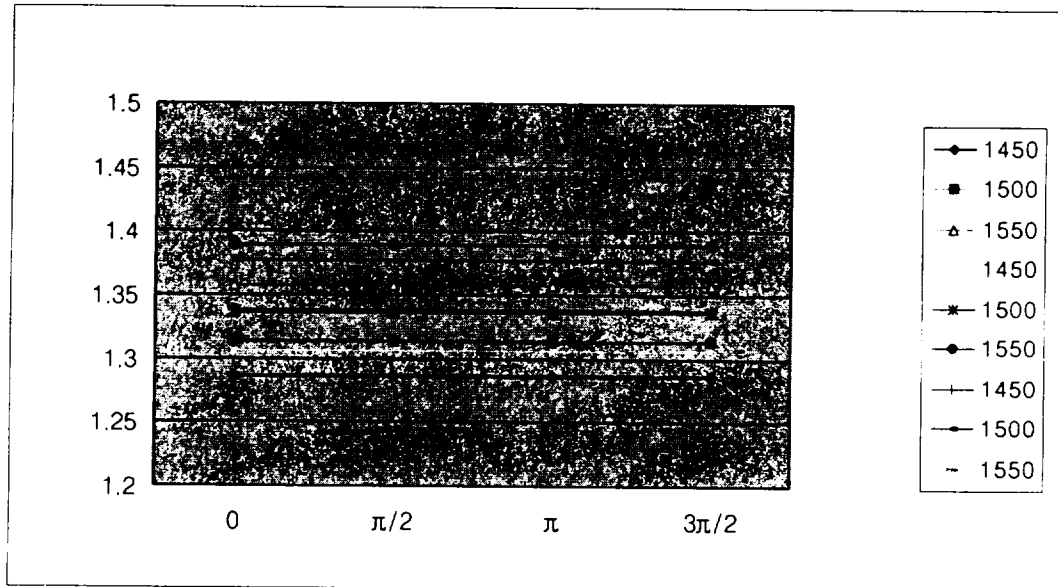
d) Harmonic voltage phase angle = $3\pi/2$

Fig. 7 Nonsinusoidal voltage waveforms in VDF = 10% which include fundamental with 7th order harmonic and current waveforms at 1500rpm

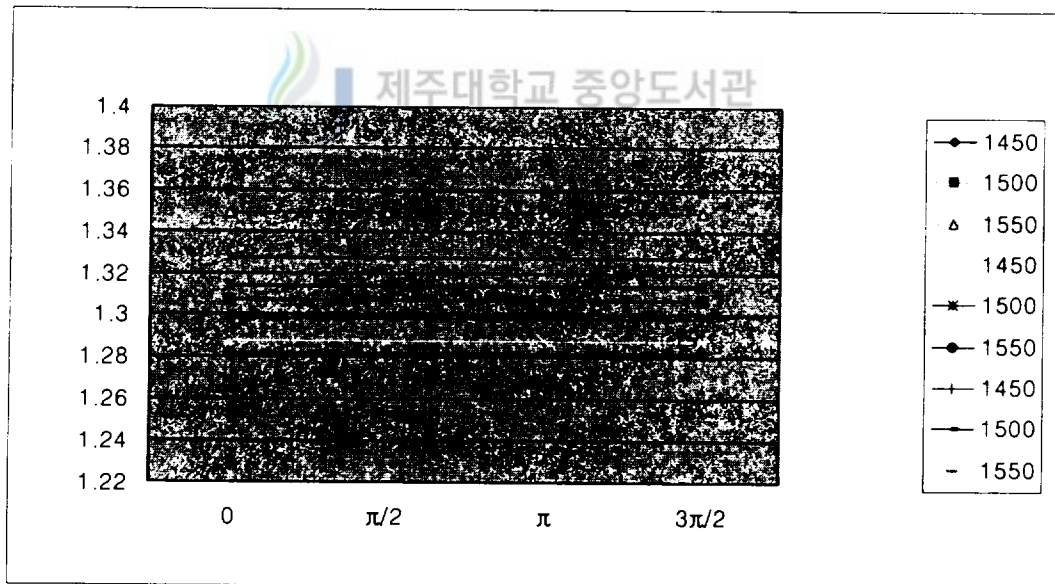
Table 3 Comparison of current form factor[pu] of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7

	Harmonic order	2th			4th			5th			7th		
V D F [%]	Harmonic phase angle [rad]	Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]		
		1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550
5	0	1.286	1.313	1.357	1.282	1.307	1.349	1.278	1.302	1.343	1.279	1.304	1.345
	$\pi/2$	1.286	1.313	1.357	1.282	1.307	1.349	1.268	1.291	1.330	1.274	1.298	1.338
	π	1.286	1.313	1.357	1.282	1.307	1.349	1.285	1.311	1.354	1.283	1.307	1.349
	$3\pi/2$	1.286	1.313	1.357	1.282	1.307	1.349	1.295	1.322	1.367	1.288	1.314	1.357
10	0	1.306	1.337	1.389	1.288	1.314	1.359	1.278	1.303	1.345	1.280	1.305	1.347
	$\pi/2$	1.306	1.337	1.389	1.288	1.314	1.359	1.259	1.282	1.319	1.269	1.292	1.332
	π	1.306	1.337	1.389	1.288	1.314	1.359	1.293	1.320	1.366	1.286	1.312	1.356
	$3\pi/2$	1.306	1.337	1.389	1.288	1.314	1.359	1.313	1.343	1.393	1.297	1.324	1.371
15	0	1.338	1.377	1.441	1.298	1.327	1.375	1.281	1.307	1.351	1.282	1.307	1.350
	$\pi/2$	1.338	1.377	1.441	1.298	1.327	1.375	1.254	1.275	1.313	1.266	1.289	1.329
	π	1.338	1.377	1.441	1.298	1.327	1.375	1.304	1.333	1.383	1.292	1.318	1.364
	$3\pi/2$	1.338	1.377	1.441	1.298	1.327	1.375	1.334	1.368	1.425	1.308	1.337	1.387

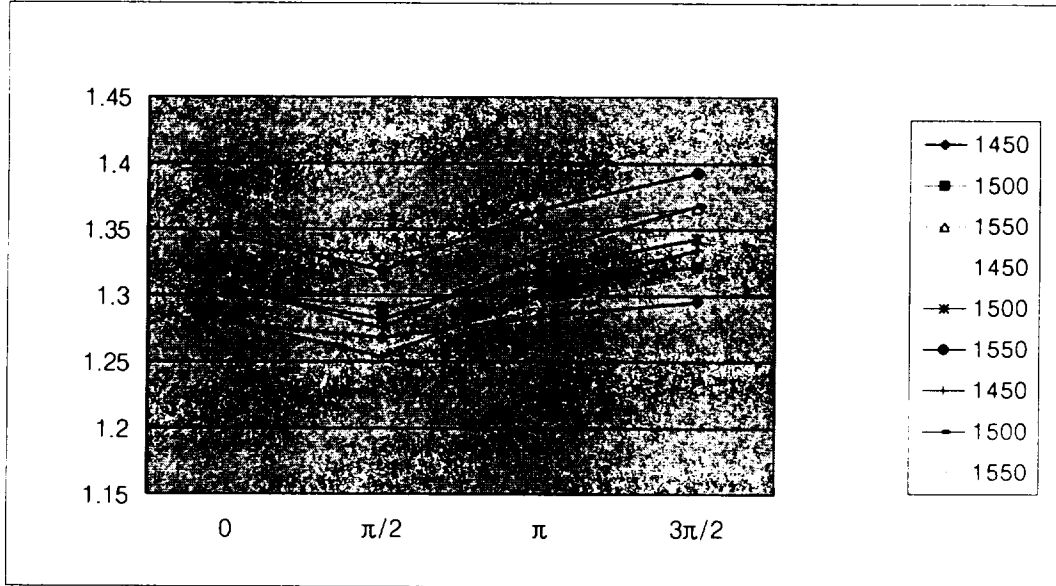
Fig. 8 Comparison of current form factor with the voltage harmonic orders from 2 to 7



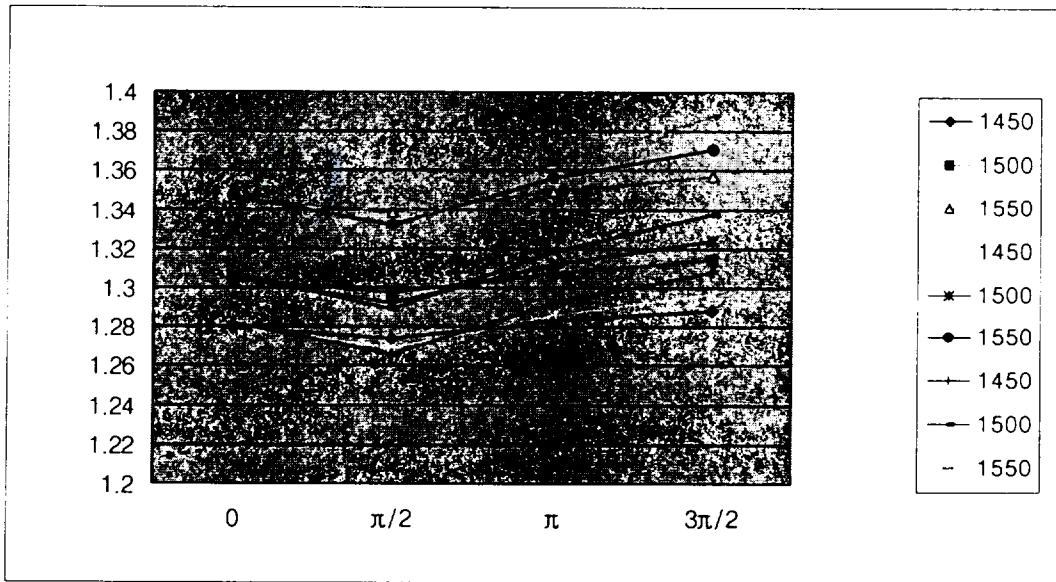
a) Current form factor with 2nd order harmonic



b) Current form factor with 4th order harmonic



c) Current form factor with 5th order harmonic



d) Current form factor with 7th order harmonic

Table 3과 Fig. 8에서 보듯이 입력 전류파형률은 경부하가 될 수록 커지며 제2차, 제4차 우수고조파에서 전압왜형률이 클수록 커지고 전압고조파 위상각과 무관하지만 부하 변동에 따라 변화하고 있음을 알 수 있다.

기수고조파에서 입력 전류파형률은 전압왜형률과의 규칙성은 우수고조파의 경우와 마찬가지로 경부하가 될 수록 커지고 있으며, 전압고조파 위상각에 따라 달라지고 있음을 알 수 있고, 기수고조파에서 전압고조파 위상각의 $\pi/2[\text{rad}]$ 에서 전압왜형률이 클수록 작아지고 다른 위상각에서는 이와 반대로 전압왜형률이 클수록 커지고 있다는 것을 나타내고 있다.



Table 4 Comparison of input voltage[V] of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7

V D F [%]	Harmonic order	2th			4th			5th			7th		
	Harmonic phase angle [rad]	Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]		
		1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550
5	0	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1
	$\pi/2$	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1
	π	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1
	$3\pi/2$	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1	120.1
10	0	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6
	$\pi/2$	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6
	π	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6
	$3\pi/2$	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6
15	0	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3
	$\pi/2$	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3
	π	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3
	$3\pi/2$	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3	121.3

Fig. 9 Comparison of input voltage with the voltage harmonic orders from 2 to 7

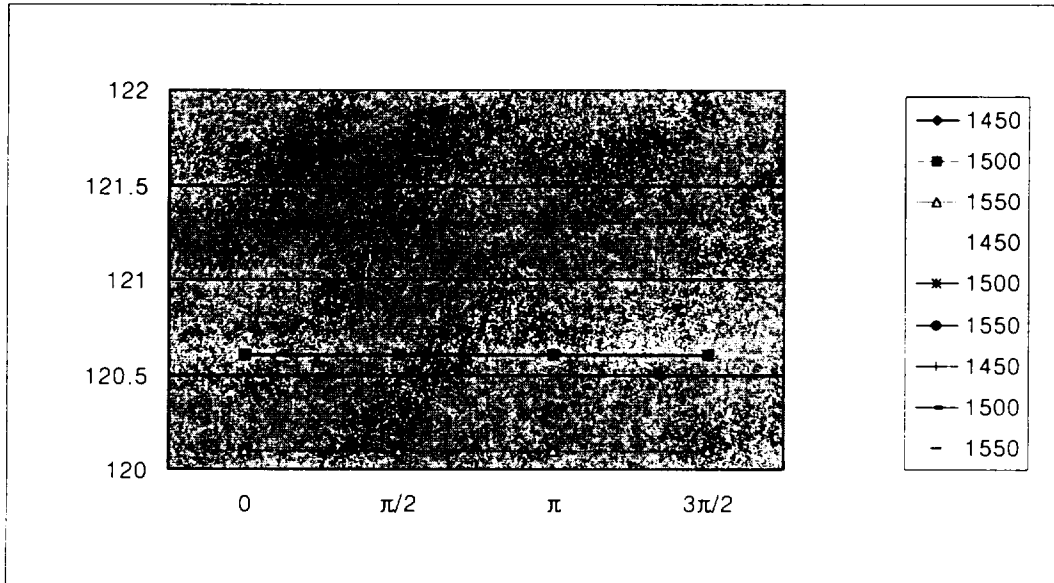
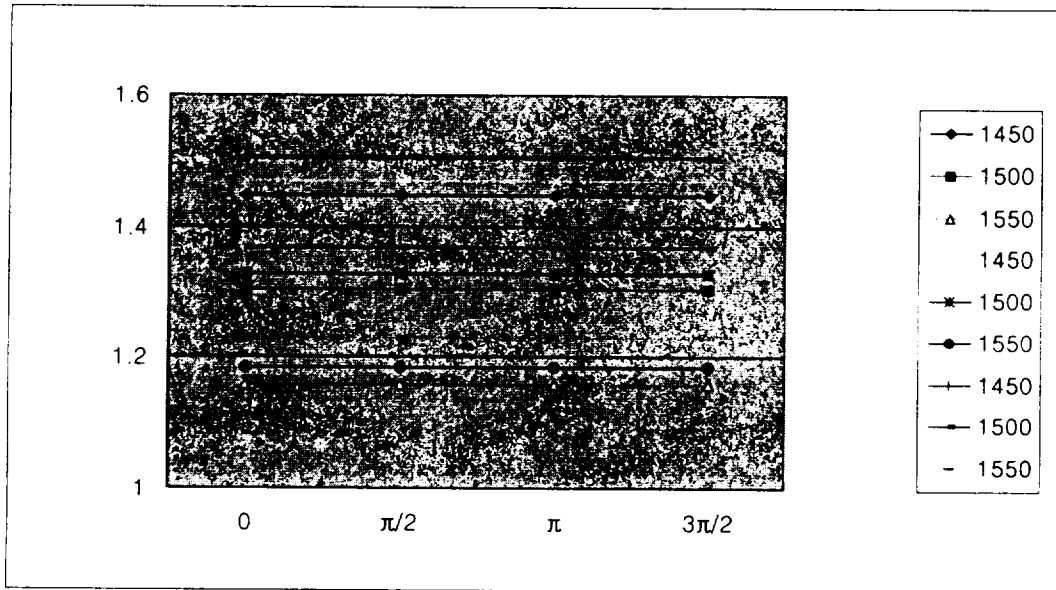


Table 4와 Fig. 9에서 보듯이 입력 전압 실효치는 전압고조파의 차수, 고조파 위상각, 부하변동에 따라 무관하다는 것을 알 수 있으며, 전압왜형률이 15%일 때 121.3V로 정격전압에 대한 변화율이 1.08로 전압왜형률 변화에 따른 변화가 매우 적다.

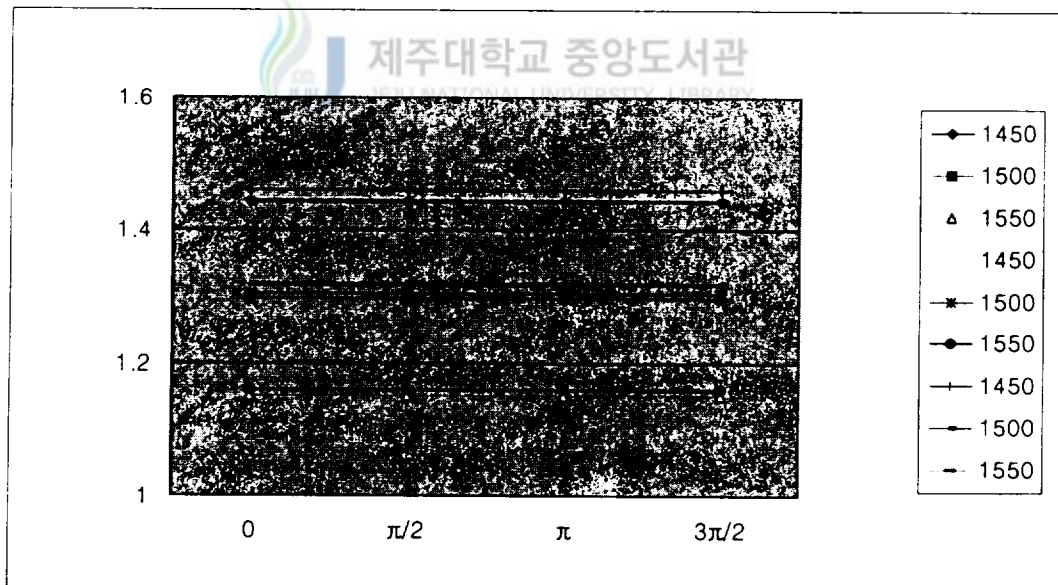
Table 5 Comparison of input current[A] of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7

V D F [%]	Harmonic order	2th			4th			5th			7th		
	Harmonic phase angle [rad]	Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]		
		1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550
5	0	1.447	1.303	1.157	1.442	1.297	1.151	1.441	1.297	1.150	1.440	1.296	1.149
	$\pi/2$	1.447	1.303	1.157	1.442	1.297	1.151	1.441	1.297	1.150	1.440	1.296	1.149
	π	1.447	1.303	1.157	1.442	1.297	1.151	1.441	1.297	1.150	1.440	1.296	1.149
	$3\pi/2$	1.447	1.303	1.157	1.442	1.297	1.151	1.441	1.297	1.150	1.440	1.296	1.149
10	0	1.469	1.327	1.185	1.448	1.304	1.159	1.446	1.302	1.156	1.443	1.299	1.152
	$\pi/2$	1.469	1.327	1.185	1.448	1.304	1.159	1.446	1.302	1.156	1.443	1.299	1.152
	π	1.469	1.327	1.185	1.448	1.304	1.159	1.446	1.302	1.156	1.443	1.299	1.152
	$3\pi/2$	1.469	1.327	1.185	1.448	1.304	1.159	1.446	1.302	1.156	1.443	1.299	1.152
15	0	1.505	1.367	1.229	1.459	1.317	1.173	1.454	1.310	1.166	1.447	1.303	1.157
	$\pi/2$	1.505	1.367	1.229	1.459	1.317	1.173	1.454	1.310	1.166	1.447	1.303	1.157
	π	1.505	1.367	1.229	1.459	1.317	1.173	1.454	1.310	1.166	1.447	1.303	1.157
	$3\pi/2$	1.505	1.367	1.229	1.459	1.317	1.173	1.454	1.310	1.166	1.447	1.303	1.157

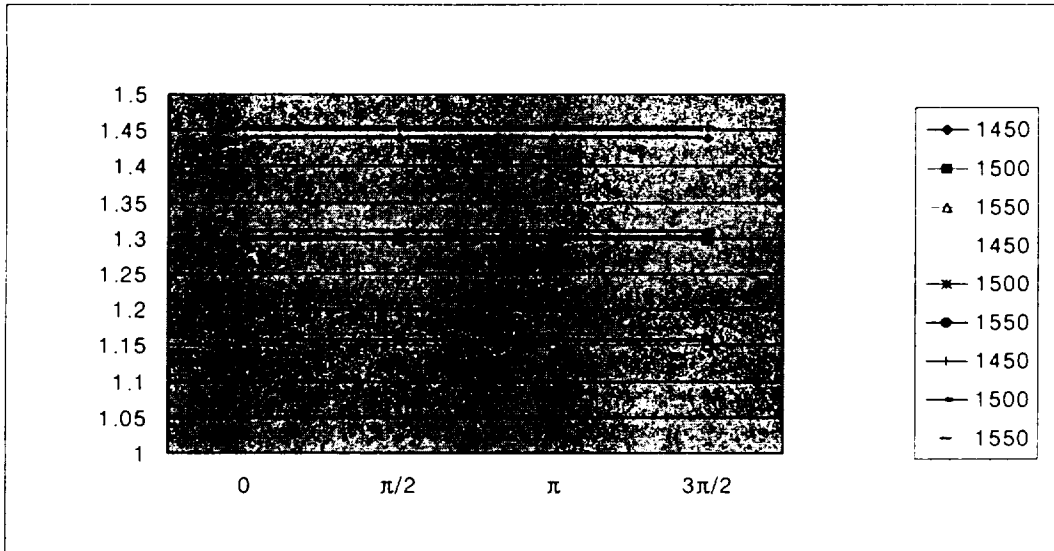
Fig. 10 Comparison of input current with the voltage harmonic orders from 2 to 7



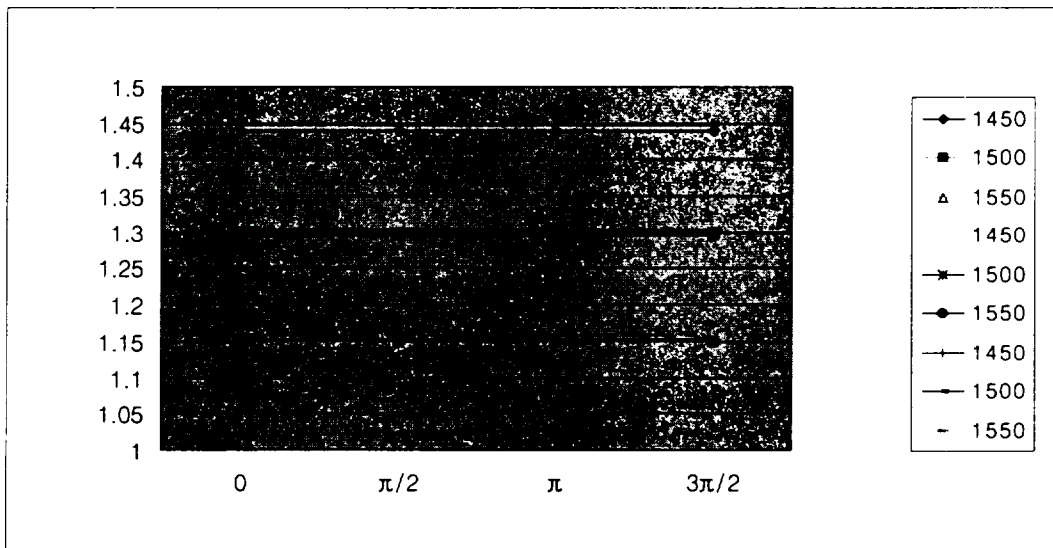
a) Input current with 2nd order harmonic



b) Input current with 4th order harmonic



c) Input current with 5th order harmonic



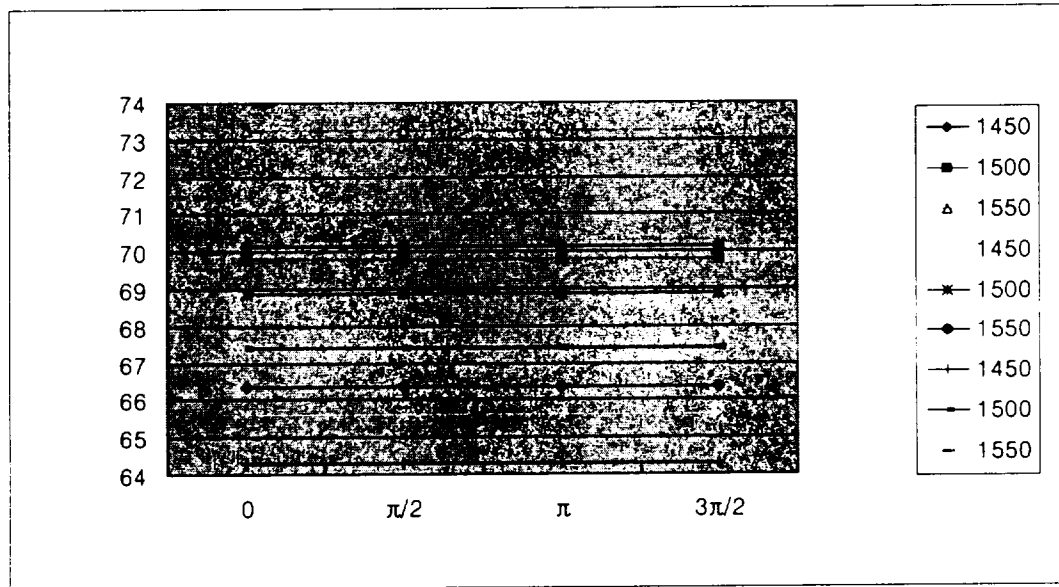
d) Input current with 7th order harmonic

Table 5와 Fig. 10에서 보듯이 입력 전류 실효치는 부하가 증가하면 증가하고 전압 왜형률이 클 수록 커지며, 전압고조파의 차수가 클수록 매우 낮은 비율로 감소하지만 전압고조파 위상각의 영향은 받지 않는다.

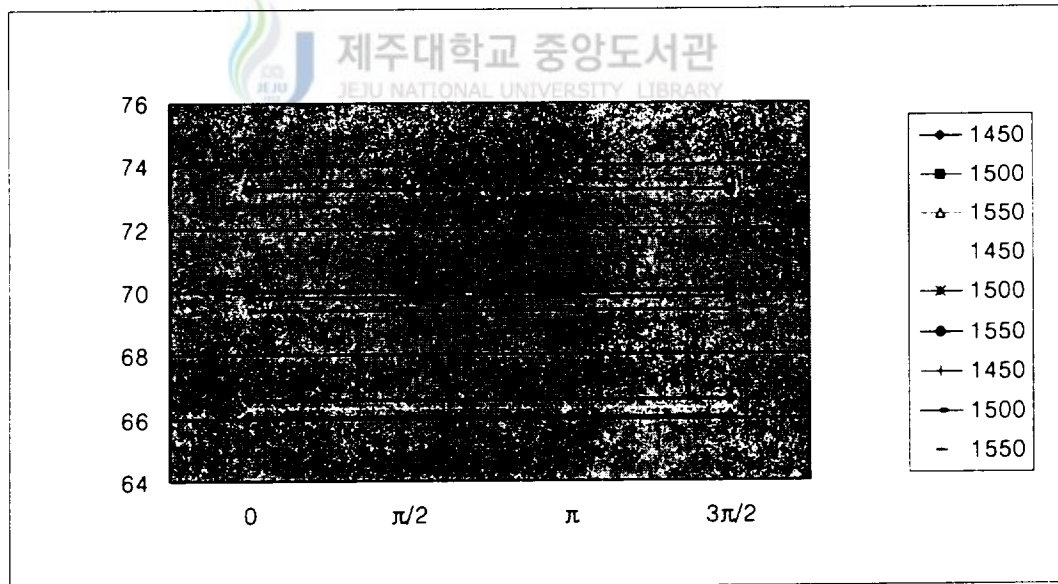
Table 6 Comparison of efficiency[%] of the induction motor with the voltage harmonic orders from 2 to 7

V D F [%]	Harmonic order	2th			4th			5th			7th		
	Harmonic phase angle [rad]	Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]			Speed[rpm]		
		1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550	1450	1500	1550
5	0	66.364	69.815	73.246	66.560	70.045	73.524	66.574	70.063	73.548	66.602	70.096	73.587
	$\pi/2$	66.364	69.815	73.246	66.560	70.045	73.524	66.574	70.063	73.548	66.602	70.096	73.587
	π	66.364	69.815	73.246	66.560	70.045	73.524	66.574	70.063	73.548	66.602	70.096	73.587
	$3\pi/2$	66.364	69.815	73.246	66.560	70.045	73.524	66.574	70.063	73.548	66.602	70.096	73.587
10	0	65.582	68.890	70.126	66.354	69.799	73.222	66.413	69.872	73.315	66.523	70.001	73.472
	$\pi/2$	65.582	68.890	70.126	66.354	69.799	73.222	66.413	69.872	73.315	66.523	70.001	73.472
	π	65.582	68.890	70.126	66.354	69.799	73.222	66.413	69.872	73.315	66.523	70.001	73.472
	$3\pi/2$	65.582	68.890	70.126	66.354	69.799	73.222	66.413	69.872	73.315	66.523	70.001	73.472
15	0	64.311	67.391	70.319	66.015	69.393	72.725	66.146	69.554	72.929	66.392	69.845	73.280
	$\pi/2$	64.311	67.391	70.319	66.015	69.393	72.725	66.146	69.554	72.929	66.392	69.845	73.280
	π	64.311	67.391	70.319	66.015	69.393	72.725	66.146	69.554	72.929	66.392	69.845	73.280
	$3\pi/2$	64.311	67.391	70.319	66.015	69.393	72.725	66.146	69.554	72.929	66.392	69.845	73.280

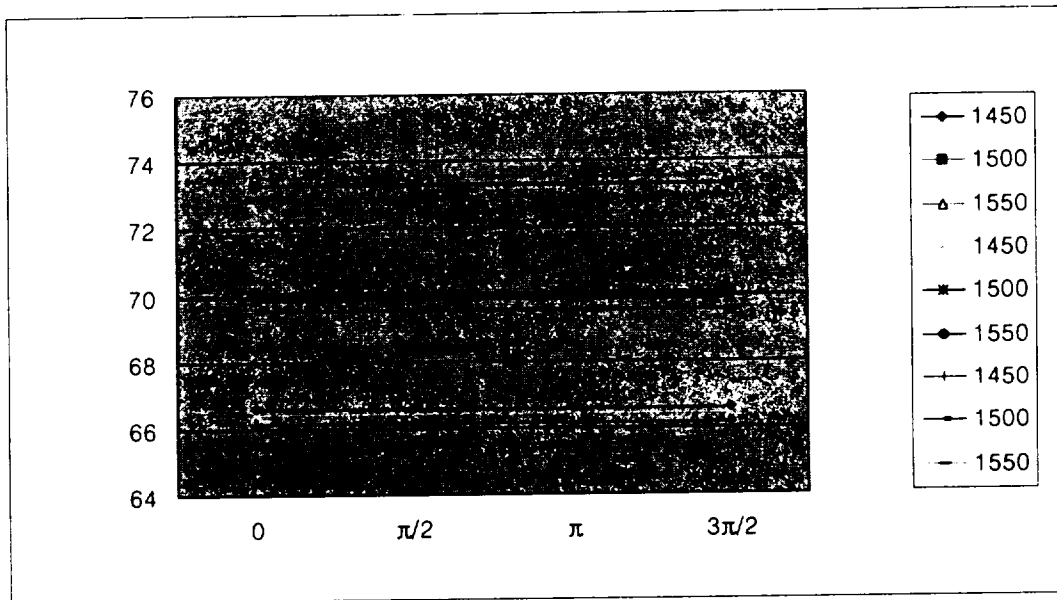
Fig. 11 Comparison of efficiency with the voltage harmonic orders from 2 to 7



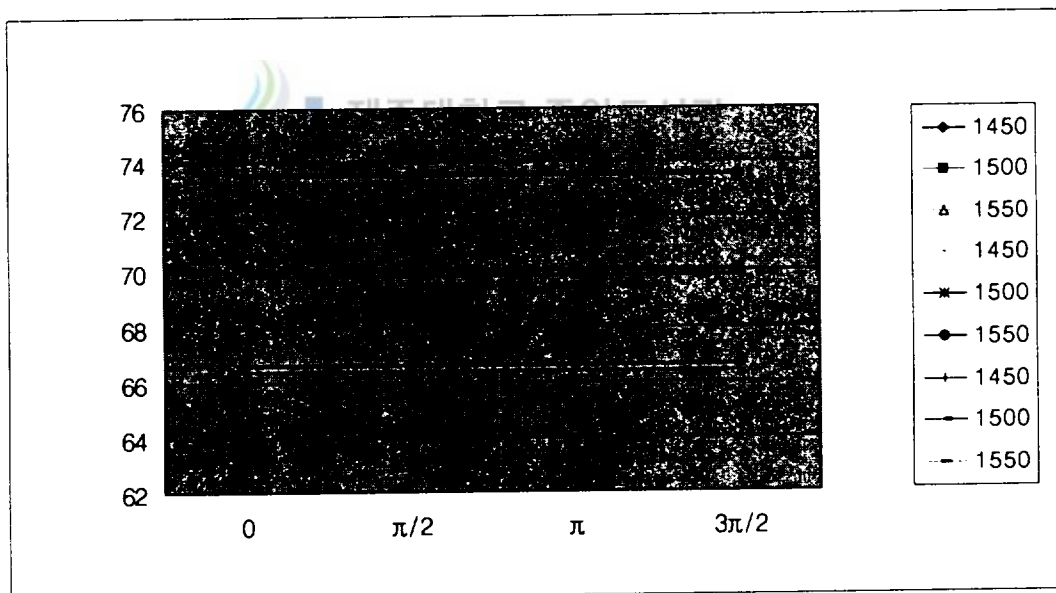
a) Efficiency with 2nd order harmonic



b) Efficiency with 4th order harmonic



c) Efficiency with 5th order harmonic



d) Efficiency with 7th order harmonic

Table 6과 Fig. 11에서 보듯이 효율은 부하가 증가할수록 작아지고 전압왜형률이 클수록 작아지며 전압고조파의 차수가 클수록 커지는 경향이 있지만 전압고조파 위상각에 따라서 변동하지 않는다.

이상의 분석을 통하여 알 수 있듯이 전압고조파에 의한 유도전동기의 운전에서 운전 성능과 관계된 전류나 효율 등은 전압고조파의 차수와 전압왜형률 즉, 전압고조파의 크기에 따라 변화하지만 위상각에 의해서는 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나, 인가 전압 파형과 관계된 전압파형률과 전류파형률은 전압고조파의 차수에 따라 영향을 받을 뿐만 아니라 전압고조파 중 기수고조파에서만 위상각의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.



IV. 결 론

3상 유도전동기의 인가전압이 기본파와 저차수의 고조파로 합성된 비정현파 전압으로 전동기가 운전되는 경우에 전압왜형률과 고조파 위상각에 따른 전류왜형률, 전압파형률, 전류파형률, 전압실효치, 전류실효치, 그리고 효율을 IEEE T형 등가회로를 사용하여 계산하고 이들을 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

첫째, 모든 특성값들은 전압왜형률의 영향을 받으며, 입력전압 실효치를 제외한 모든 값들이 고조파 차수의 영향을 받는다.

둘째, 운전성과 관련된 전류나 효율은 고조파 위상각의 영향을 받지 않는다.

셋째, 인가전압 파형과 관계된 전압파형과 전류파형률은 기수고조파에서만 고조파 위상각의 영향을 받는다.



참 고 문 헌

- [1] C.Y. LEE, Y.J. Lin and C.R. Chen, The Effect of Harmonic Phase angle on the Operation Performance of a Three-phase Induction motor, Power Engineering Summer Meeting, IEEE, Vol.4, pp.2499-2505, 2000.
- [2] L.A. Doggett and E.R. Queer, Induction Motor Operation with Non-Sinusoidal Impressed Voltages, Transactions AIEE, Vol.48, pp.1217-1220, 1929.
- [3] G.C. Jain, The Effect of Voltage Waveshape on the Performance of a 3-Phase Induction Motor, IEEE Trans. on PAS, Vol.83, No.6, pp.561- 566, 1964.
- [4] E.A. Klingshirn and H.E. Jordan, Polyphase Induction Motor erformance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-87, No.3, pp.624-631, 1968.
- [5] C.Y. Lee, W.J. Lee, Y.N. Wang and J.C. Gu, Effects of Voltage Harmonics on the Electrical and Mechanical Performance of a Three-phase Induction Motor, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, IEEE, 3-8 May, pp.88-94, 1998.
- [6] C.Y. Lee and W.J. Lee, Effects of Nonsinusoidal Voltage on the operation Performance of a Three-phase Induction Motor, IEEE Trans. on EC, Vol.14, No.2, pp.193-201, 1999.

- [7] A. Vamvakari, A. Kandianis, A. Kladas, S. Manias and J. Tegopoulos, Analysis of Supply Voltage Distortion Effects on Induction Motor Operation, IEEE Trans. on EC, Vol.16, No.3, pp.209-213, 2001.
- [8] P. Lunmyong and C. Chat-uthai, A Study of Harmonics Effect on Performance of Three-phase Induction Motor Using BSRG, Power System Technology, Proceedings, International Conference, Vol.2, pp.1190-1194, 2002.
- [9] 김태한, 좌종근, 3상 유도전동기 운전에 대한 전압고조파 영향의 분석, 제주대학교 공과대학 첨단기술연구소 논문집, 제16권, 1호, pp.74-78, 2005.



감사의 글

대학원을 입학하여 한편의 논문을 완성되기까지 많은 관심과 격려로 늘 변함없이 따뜻하게 지도해 주신 좌종근 교수님의 은혜에 진심으로 깊은 감사드립니다.

제주대학교 산업대학원에 입학한 것이 엇그제 같은데 벌써 졸업을 준비하게 되었습니다. 이렇게 빠르게 느껴지는 것은 학교생활이 저에게는 무척 소중한 값진 것이었기 때문일 것입니다. 직장생활과 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지는 않았지만 뒤쳐지지 않고 무사히 졸업을 할 수 있게 된 것을 뒤돌아 보면 그동안 저를 도와준 많은 고마운 분들이 계셨다는 것을 다시금 생각하게 합니다.

좁은 지면에 그분들을 일일이 열거하면서 감사의 마음을 전하지는 못하지만 이 모든 것이 저를 옆에서 지도해 주시고 끊임없이 격려를 주신 모든 분들께 이 글을 통해 감사의 말씀을 전해드리고자 합니다.

또한, 제가 전기공학에 대한 폭넓은 식견을 가질 수 있도록 도움을 주셨을 뿐만 아니라 저의 미흡한 학위논문을 자상하게 심사해 주시고 많은 조언을 해주신 김일환 교수님, 김호찬 교수님께 감사드립니다. 그리고 산업대학원 석사과정을 시작하면서부터 항상 옆에서 가르침을 주시고, 석사학위 연구에 많은 격려와 조언을 아끼지 않으신 오성보 교수님과 김세호 교수님, 이개명 교수님께 머리 숙여 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

대학원 과정에서 학업을 같이한 이상근, 김영환 동기와 김홍찬, 김정혁 선배님 및 후배님께도 감사드립니다.

대학원 생활을 하면서 배운 지식 못지 않게 더욱 값진 것은 교수님들은 물론 선후배들과 인간적인 교류를 하면서 돈독한 유대감을 형성하고 따뜻한 마음을 배운 점입니다. 앞으로 따뜻한 마음으로 항상 이웃을 생각하고 남을 배려하는 자세로 살아가고자 합니다.

직장생활을 하면서 자기발전의 초석이 될 수 있도록 많은 배려와 도움을 주신 한국폴리텍대학 제주캠퍼스 박철성 학장님, 허광 교학팀장님, 전기제어학과 교수님과 모든 교직원들에게 깊은 감사드립니다.

끝으로 항상 부족한 저를 아낌없는 지원과 믿음으로 지켜봐 주신 부모님, 장인 장모님을 비롯하여 가족들에게 감사드리며 배움의 길은 끝이 없다고 하면서 용기를 북돋아 주고 삶의 원동력이 되어 준 아내 이미경과 두 자녀 우혁, 진혁에게 고마움과 사랑의 마음을 전하며 오늘의 작은 열매의 결실을 드립니다.

2006년 6월

